

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Katinić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.
Dr. sc. Mateja Šnajder Musa, mag. ing.

Student:

Domagoj Katinić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima Mateji Musa Šnajder i Zdravku Schauperlu na trudu, uloženom vremenu i savjetima.

Domagoj Katinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Domagoj Katinić**

Mat. br.: 0035193636

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Elektrokemijsko ispitivanje TiMg kompozita**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Electrochemical testing of TiMg composites**

Opis zadatka:

Kompoziti s metalnom matricom predstavljaju relativno novu grupu tehničkih materijala koja zbog svojih dobrih svojstava ima sve širu primjenu. Obzirom da svojstva tih materijala ovise o kemijskom sastavu i strukturi tj. o udjelu, rasporedu i orijentaciji ojačala, za primjenu na zahtjevnim mjestima kao što je biomedicina važno je kvalitetno karakterizirati ponašanje takvog kompozita u različitim okolnim uvjetima.

U teoretskom dijelu zadatka potrebno je dati uvid u tehnologije proizvodnje metalnih kompozita s posebnim naglaskom na metalurgiju praha. Potrebno je opisati postupak izrade kompozita na bazi titana postupkom metalurgije praha, konkretno BP-ECAC postupkom.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je karakterizirati mikrostrukturu TiMg kompozita prije provođenja elektrokemijskih ispitivanja. Nakon karakterizacije potrebno je na tim uzorcima provesti dostupna laboratorijska elektrokemijska ispitivanja s ciljem uvida u ponašanje materijala pri različitim vanjskim uvjetima.

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o provedenim ispitivanjima.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schaperl

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IVV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Definicija i podjela kompozitnih materijala.....	2
2.2. Kompoziti s metalnom matricom.....	4
3. PROIZVODNJA KOMPOZITA S METALNOM MATRICOM.....	7
3.1. Metalurgija praha	9
3.1.1. Postupci metalurgije praha.....	10
3.1.2. Proizvodnja praha	11
3.2. Svojstva praha	12
3.2.1. Kemijska svojstva praha	12
3.2.2. Fizikalna svojstva praha.....	12
3.2.3. Metalurška svojstva praha.....	13
3.3. Svojstva materijala dobivenih metalurgijom praha	14
4. TITAN I NJEGOVE LEGURE	15
3.1. Svojstva titana	15
3.1. Titanove legure	18
3.1. Primjena titana i njegovih legura	19
5. MAGNEZIJ I NJEGOVE LEGURE.....	20
5.1. Svojstva magnezija i njegovih legura	20
6. ESKPERIMENTALNI DIO.....	22
6.1. Opis eksperimenta.....	22
6.2. Elektrokemijsko ispitivanje.....	22
6.3. Metalografska analiza materijala	26
6.3.1. Metalografska priprema uzoraka	26
6.3.2. Analiza mikrostrukture uzoraka.....	28
6.4. Analiza ispitivanja i rezultati	35
7. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela kompozita s metalnom matricom	4
Slika 2.	Osnovni oblici ojačala kompozita s metalnom matricom	5
Slika 3.	Tehnološke operacije konvencionalnih postupaka metalurgije praha.....	10
Slika 4.	Postupak plinske atomizacije	12
Slika 5.	Oblici čestica praha i pripadajući proizvodni postupci	13
Slika 6.	Kristalne strukture čistog titana.....	15
Slika 7.	Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure.....	16
Slika 8.	Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure	17
Slika 9.	Uređaj za elektrokemijsko ispitivanje Potentiostat/Galvanostat.....	23
Slika 10.	Shema osnovnog elektrokemijskog ispitivanja na Potentiostatu/Galvanostatu	23
Slika 11.	Tipična elektrokemijska ćelija sa osnovnim dijelovima	25
Slika 12.	Parametri metalografske pripreme uzoraka.....	27
Slika 13.	Mikrostruktura TiMg5II u početnom stanju uz povećanje 200x.....	29
Slika 14.	Mikrostruktura TiMg10II u početnom stanju uz povećanje 100x.....	29
Slika 15.	Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 100x.....	30
Slika 16.	Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 200x.....	30
Slika 17.	Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 500x.....	31
Slika 18.	Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 100x	31
Slika 19.	Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 200x	32
Slika 20.	Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 500x	32
Slika 21.	Mikrostruktura uzorka TiMg10I nakon korozije uz povećanje 200x.....	33
Slika 22.	Mikrostruktura uzorka TiMg10I nakon korozije uz povećanje 500x.....	33
Slika 23.	Mikrostruktura uzorka TiMg10II nakon korozije uz povećanje 200x	34
Slika 24.	Mikrostruktura uzorka TiMg10II nakon korozije uz povećanje 500x	34
Slika 25.	Ovisnost potencijala o vremenu	36
Slika 26.	Tafel krivulja za TiMg5 i TiMg10	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike postupaka metalurgije praha.....	9
Tablica 2. Vrijednosti fizikalnih i mehaničkih svojstava magnezija.....	21
Tablica 3. Svojstva materijala na kojima su provedena elektrokemijska ispitivanja.....	26
Tablica 4. Elektrokemijski parametri dobiveni ekstrapolacijom Tafelovih krivulja i krajnjih vrijednosti Ekor potencijala.....	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m ³	Gustoća
E	GPa	Modul elastičnosti
α	K ⁻¹	Toplinska rastezljivost
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
A	%	Istezljivost
ϑ	°C	Temperatura
w	%	Maseni udio
E_w	g	Ekvivalentna masa
A	mm ²	Površina
E_{kor} vs. ZKE	V	Elektrokemijski(korozijski) potencijal
I_{kor}	μA	Jakost korozijske struje
β_A	/	Nagib anodnog dijela Tafelove krivulje
B_k	/	Nagib katodnog dijela Tafelove krivulje
v_{kor}	mm/god	Brzina korozije

SAŽETAK

U sklopu teoretskog dijela definirat će se kompozitni materijali i njihova svojstva s naglaskom na kompozite s metalnom matricom. Ovdje se radi o primjeni kod biomedicinskih implantata gdje težište ima titan i njegova svojstva te djelomično i magnezij. Što se tiče postupaka dobivanja tih kompozita, posebna pažnja će biti posvećena postupku dobivanja metalurgijom praha.

U eksperimentalnom dijelu pojasnit će se tijekom eksperimenta te oprema korištena za ispitivanje. Uporabom triju metoda za elektrokemijsko ispitivanje uzorka programski softver izbacuje grafove koji opisuju elektrokemijsko ponašanje materijala. Analizom rezultata dolazi se do osnovnih parametara ispitivanja te samim time i zaključaka o korozijskom ponašanju titan-magnezij kompozita.

Ključne riječi: kompozit, titan-magnezij, implantati, metalurgija praha, elektrokemijsko ispitivanje, korozija

SUMMARY

Within the framework of a theoretical part of the study, composite materials and their properties will be defined with emphasis on metal matrix composites. In this situation, application is intended for biomedicine implants where titanium and its properties dominate, as well as magnesium. Between the production processes, the powder metallurgy process will be elaborated in the most part.

In the experimental part, sequence of the examination will be detailed and also the equipment needed. Using the three methods for electrochemical evaluation, software will yield the plots which describe electrochemical behaviour of the examined material. Analysis of the results will help in calculating the basic parameters of the examination and make conclusions about the corrosion-resistance of the titanium-magnesium composite.

Key words: composite material, titanium-magnesium, implants, powder metallurgy, electrochemical examination, corrosion,

1. UVOD

Kompozitni materijali su danas među novijim materijalima čiji se razvoj konstantno širi i unapređuje. Zbog svoje fleksibilnosti, kompozite možemo danas naći u svim područjima primjene kao što su zrakoplovna industrija, automobilska industrija, medicina, balistika, vojna industrija i slično.

Budući da su kompoziti građeni od dvaju ili više materijala, njihove mogućnosti su brojne. Kombiniranjem tih materijala možemo dobiti svojstva kakva nema niti jedan od njih zasebno i to predstavlja jednu od glavnih prednosti kompozita u odnosu na neke klasične materijale.

TiMg kompozit je relativno neistražen materijal za primjenu kod biomedicinskih implantata. Kao materijal implantata se dosad uglavnom koristio titan, ali titan ima veliku krutost, što stvara problem pogoršavanja biokompatibilnosti implantata s kostima tijekom duljeg vremenskog perioda.

Dodatkom magnezija se smanjuje krutost kompozita što pomaže u prijanjanju implantata s kostima te se njime poboljšava i kemijska postojanost. Nadalje, magnezij je jeftiniji od titana pa njegovim dodatkom smanjujemo cijenu proizvodu te time povećavamo njegovu produktivnost. Ključni razlog dodavanja Mg jest spontano otapanje u površinskim slojevima implantata koji bi povećali njegovu hrapavost te na taj način doprinijeli procesu obrastanja koštanog tkiva oko implantata i formiranju jače veze implantat/kost. Pritom se svakako želi izbjeći prodiranje korozije u dublje slojeve materijala čime bi se mogao narušiti integritet i geometrija implantata stoga treba voditi računa o tome da otapanje ne bude prekomjerno.

Stoga su u sklopu ovog rada provedena ispitivanja koja će pokazati je li TiMg kompozit zaista bolji izbor za biomedicinske implantate od čistog titana.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Definicija i podjela kompozitnih materijala

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvode se umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem se mogu postići neobične kombinacije svojstava kao što su krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna, toplinska).

Dakle kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza je kontinuirana (matrica) i okružuje ostale faze (ojačalo).

Parametri o kojima ovise svojstva kompozita su: svojstva matrice i ojačala, veličina raspodjela konstituenata, volumni udio konstituenata, oblik konstituenata te priroda i jakost veze među konstituentima.

Kompoziti se dijele na: **kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite i strukturne kompozite (slojevite kompozite i sendvič konstrukcije).**

Vlaknima ojačani kompoziti prema vrsti matrice se dijele na **polimerne (PMC), metalne (MMC) i keramičke kompozite (CMC)**[1].

Kako bi znali koji materijal odabrati za matricu, a koji za ojačalo, potrebno je znati pozitivne i negativne strane svakog od njih odnosno poznavati njihova svojstva.

Prednosti i nedostaci metala

Prednosti: električna i termička provodljivost, visoka čvrstoća i duktilnost, visoka tvrdoća, magnetičnost

Nedostaci: visoka gustoća, niska otpornost na puzanje i osrednja otpornost na koroziju

Prednosti i nedostaci polimera

Prednosti: duktilnost, dobra oblikovljivost, otpornost na koroziju, visok omjer čvrstoća/masa

Nedostaci: niska krutost i čvrstoća, slaba otpornost na visoke temperature

Prednosti i nedostaci keramike

Prednosti: električni i termički izolatori, dobra otpornost na koroziju i trošenje, visoka čvrstoća i krutost, otpornost na puzanje i niska gustoća

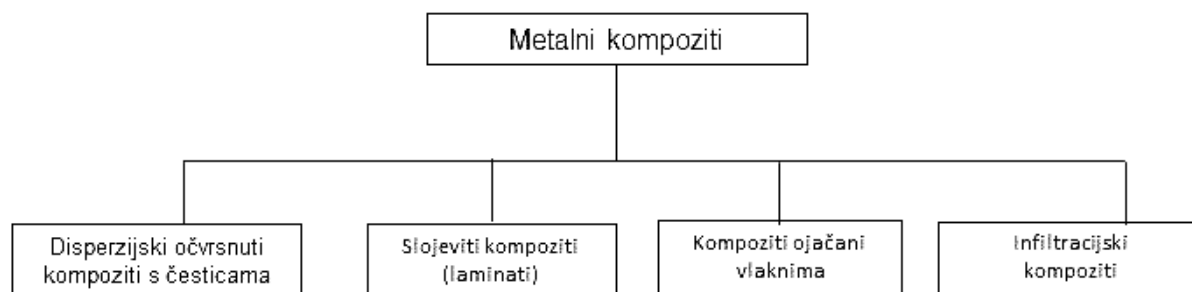
Nedostaci: loša obradivost i oblikovljivost, niska tvrdoća

Ovisno o tome koji su zahtjevi u eksploataciji, odabire se optimalna kombinacija materijala s obzirom na željena svojstva. Najvažnija svojstva kod biomedicinske primjene su biokompatibilnost, krutost i otpornost na koroziju.

2.2. Kompoziti s metalnom matricom (MMC- Metal Matrix Composite)

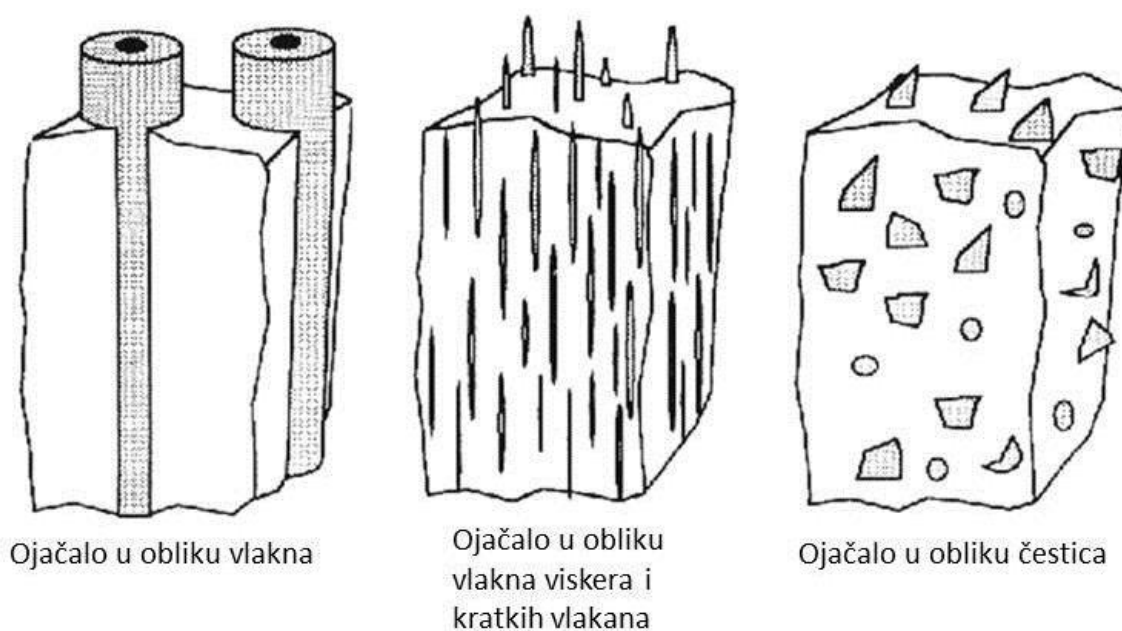
Kao što proizlazi iz naslova, radi se o kompozitima kod kojih je matrica metal (u pravilu duktilna tvar). Razlog zbog kojeg se ova vrsta kompozita sve više koriste je mogućnost primjene kompozita pri višim radnim temperaturama nego sama metalna matrice dok istovremeno ojačalo može povisiti svojstva poput specifične krutosti, specifične čvrstoće, otpornosti na abraziju, otpornosti na puzanje, toplinske vodljivosti i dimenzijske postojanosti. Međutim, kompoziti s metalnom matricom su znatno skuplji od onih s polimernom matricom, pa je njihova primjena prilično ograničena [1].

Kompoziti s metalnom matricom najčešće se klasificiraju prema materijalu i obliku ojačala što pokazuje dijagram (slika 1).



Slika 1. Podjela kompozita s metalnom matricom[2].

Kao materijali matrice koriste se superlegure, legure aluminija, magnezija, titana i bakra. Ojačala mogu biti u obliku čestica, kontinuiranih ili diskontinuiranih vlakana i viskera s volumnim udjelom od 10 do 60% kao što prikazuje slika 2.



Slika 2. Osnovni oblici ojačala kompozita s metalnom matricom.

Materijali kontinuiranih vlakana su ugljik, silicijev karbid, bor, aluminij i tvrdi metali, za razliku od diskontinuiranih ojačala, kod kojih se koriste viskeri silicijeva karbida, sjeckana vlakna od ugljika i aluminija te čestice karbida i aluminija.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da metalni kompoziti s ojačalom u obliku čestica i viskera posjeduju najveći potencijal za proizvodnju relativno jeftinih, kompaktnih proizvoda superiornih svojstava u odnosu na tradicionalne metale. Pritom su za izradu ojačala dominantne skupine keramika i metali. Glavna prednost ojačala u obliku čestica u usporedbi s vlaknima ili viskerima je izotropnost svojstava čije će vrijednosti biti u sprezi s veličinom čestica, njihovim međurazmakom i volumnim udjelom.

Kao metalne matrice uglavnom se koriste titan, magnezij i aluminij s time da su titan i aluminij ipak najzastupljeniji. To je zbog toga što oni imaju vrlo dobra mehanička svojstva zadržavajući i relativno nisku gustoću.

Aluminij i njegove legure korišteni su u najvećem broju istraživanja kao materijal matrice, pri čemu se kao ojačalo najčešće koriste čestice Al_2O_3 . Svojstva koja ga čine povoljnim za ovu primjenu uključuju visoku specifičnu čvrstoću, kemijsku postojanost, izvrsnu toplinsku i električnu vodljivost, obradivost te relativno nisku cijenu sirovine. Prvotni razvoj kompozita s aluminijском matricom započeo je u zrakoplovnoj industriji. Pritom je ključna prednost aluminija njegovo talište, dovoljno visoko za primjenu pri temperaturama višima od sobne, a dovoljno nisko da omogući relativno jeftinu i jednostavnu proizvodnju kompozita.

Legure titana koje su se pokazale najefikasnijima kao materijal matrice su α i β legure te metastabilne β legure. Ključne prednosti u odnosu na aluminij i njegove legure su puno viša specifična čvrstoća te njeno zadržavanje i na povišenim temperaturama. Iako superiorne u odnosu na aluminij, titanove legure se koriste samo u situacijama gdje je puno veća nabavna cijena sirovine opravdana visokim zahtjevima tijekom eksploatacije.

Magnezij je zbog niske gustoće također razmatran kao pogodan materijal matrice, no njegov visoki afinitet prema kisiku čini ga neprikladnim za mnoga područja primjene [2].

3. PROIZVODNJA KOMPOZITA S METALNOM MATRICOM

Postoje brojne tehnologije i postupci proizvodnje kompozita s metalnom matricom. Pri odabiru najbolje od njih, u obzir treba uzeti krajnje željene karakteristike proizvedenog kompozitnog materijala poput vrste, količine i raspodjele ojačala, materijala matrice i konačne primjene kompozita. Iako se metodom proizvodnje ne može znatno utjecati na ukupnu količinu i sastav ojačala, uvelike se može utjecati na raspodjelu ojačala u kompozitu. Općenito se proizvodnju MMC-a može podijeliti u primarni i sekundarni korak proizvodnje [3].

Tijekom primarnog koraka proizvodnje kompoziti se sintetiziraju iz materijala matrice i ojačala uslijed kojeg dolazi do formiranja veza između tih komponenti. U sekundarnom koraku sadržani su svi postupci oblikovanja, završne obrade i spajanja potrebni za izradu konkretnih dijelova iz primarnog kompozitnog materijala. Ponekad materijali matrice i ojačala nisu kompatibilni u smislu međusobne adhezije, pa je nužno prilagođavanje njihovih površinskih svojstava.

Proizvodni postupci koji se koriste za proizvodnju kompozita s metalnom matricom su:

Postupci u tekućem stanju:

- infiltracija ojačala putem tlačnog ili vakuumskog lijevanja
- lijevanje miješanjem
- lijevanje tiskanjem
- reaktivna infiltracija
- naštrcavanje

Metalurgija praha:

- prešanje i sinteriranje smjese praškastih materijala
- ekstrudiranje smjese metalnih prahova
- ekstrudiranje profila te naknadno naštrcavanje perkursorskog materijala
- vruće ekstrudiranje smjese prahova ili vlakana
- ekstrudiranje ili hladno izostatsko prešanje

Spajanje ili zavarivanje poluproizvoda**Završna obrada**

Postupci metalurgije praha predstavljaju relativno novi koncept proizvodnje. Ti se postupci odvijaju pri nižim temperaturama, pa su i mehanizmi povezivanja matrice i ojačala znatno drugačiji od onih prisutnih kod postupaka u tekućem stanju [2].

3.1 Metalurgija praha

Metalurgija praha (engl. *powder metallurgy*, skraćeno PM) se definira kao tehnologija proizvodnje praha i gotovih dijelova zagrijavanjem prethodno kompaktiranog praha tek nešto ispod temperature taljenja. Na taj se način sjedinjavanjem čestica praha jednog ili više metala proizvode čvrsta metalna tijela (proizvodi).

Koristi se za proizvodnju visokokvalitetnih dijelova, složenog oblika s visokom dimenzijskom točnošću na ekonomičan način. Primjenom novih prahova, izuzetne čistoće i znatno manje veličine zrna, kao i primjenom novih postupaka, omogućena je proizvodnja gotovih dijelova izuzetnih mikrostrukturnih karakteristika i mehaničkih svojstava.

Karakteristike metalurgije praha u odnosu na klasične proizvodne postupke dane su u tablici 1.

Tablica 1. Karakteristike postupaka metalurgije praha [4].

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> - oblikovljivost metala koje je nemoguće oblikovati drugim postupcima - proizvodnja dijelova sačinjenih od međusobno netopivih metala, smjese keramike i metala - proizvodnja dijelova željenog stupnja poroznosti - visok stupanj iskoristivosti materijala - mogućnost proizvodnje jednostavnih i složenih oblika - razvoj materijala novih mikrostruktura - proizvodnja dijelova gotovog oblika bez potrebe za naknadnom obradom odvajanjem čestica - točne dimenzije gotovih proizvoda - poboljšana magnetska svojstva 	<ul style="list-style-type: none"> - visoka cijena polaznih prahova - skupa i sofisticirana oprema za konsolidiranje (oblikovanje i sinteriranje) - stroga kontrola svih faza tehnološkog procesa - otežano rukovanje prahovima - skladištenje i rukovanje prahovima u čistoj okolini - mogućnost pojave prekomjernog poroziteta koji uzrokuje degradaciju eksploatacijskih svojstava - ograničene dimenzije gotovih proizvoda - razlike u gustoći gotovih dijelova (posebno kod jednoosnog kompaktiranja) - visoki troškovi proizvodnje - ekonomično jedino za velikoserijsku proizvodnju

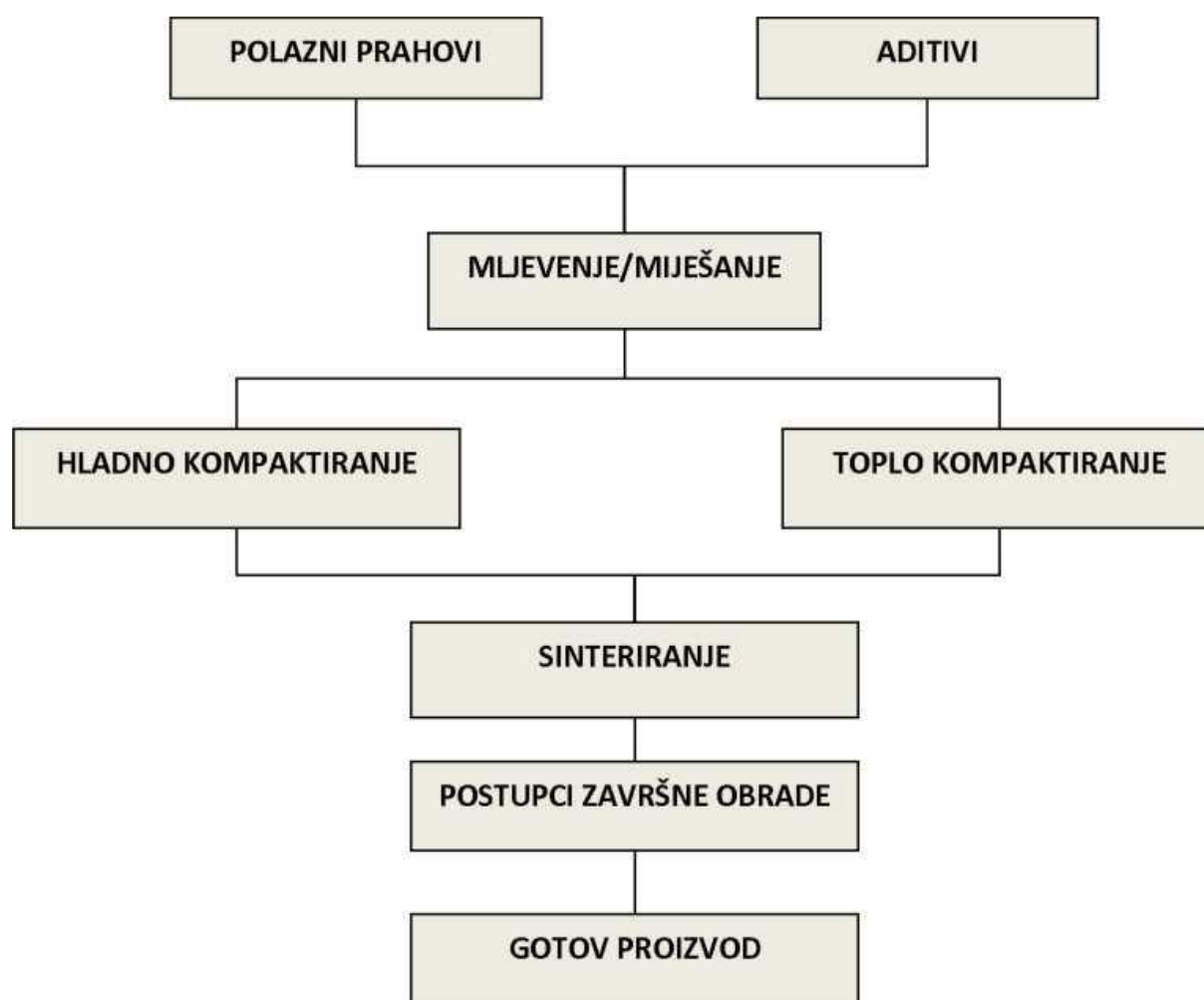
3.1.1 Postupci metalurgije praha

Postupci metalurgije praha općenito se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine:

1. **konvencionalni postupci** (engl. *press-and- sinter methods*)
2. **postupci kojima se postižu teorijske gustoće** (engl. *full density processes*).

Osnovne tehnološke operacije konvencionalnih postupaka metalurgije praha su proizvodnja praha, priprava mješavine prahova, kompaktiranje (oblikovanje) i sinteriranje, nakon čega može slijediti i neka dodatna završna obrada.

Na slici 3. je prikazan tijek nastajanja gotovog proizvoda metalurgijom praha.



Slika 3. Tehnološke operacije konvencionalnih postupaka metalurgije praha [4].

3.1.2. Proizvodnja praha

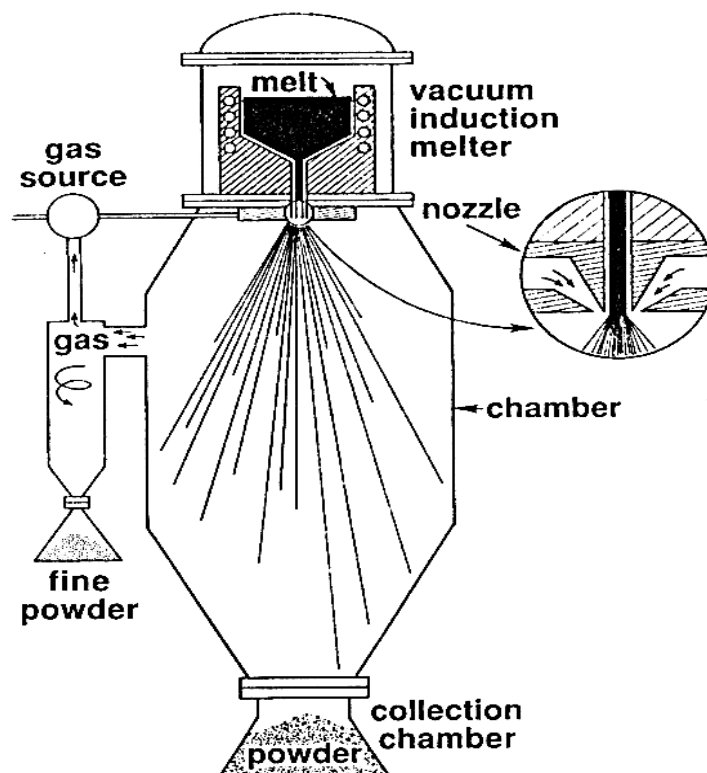
Proizvodnja praha može uslijediti iz tekućeg ili krutog stanja fizikalnim, kemijskim i elektrokemijskim metodama.

Fizikalni postupci proizvodnje praha su sljedeći:

- **mehaničko drobljenje**
- **atomizacija**

Posljednjih godina proizvodnja metalnog praha usmjerila se na atomizaciju, gdje se prah dobiva iz rastaljenog metala. Rastaljeni metal raspršuje se strujanjem fluida pod velikim pritiskom u sitne kapi, ili rastaljeni metal pada na rotirajući disk gdje dolazi do brzog skrućivanju sitne čestice. Komercijalni atomizatori mogu proizvesti i do 400 kg praha u minuti.

Plinska atomizacija koristi zrak, dušik ili argon kao fluid koji raspršuje rastaljeni metal (slika 4). Zbog visokog pritiska plina rastaljeni metal se izlaskom iz mlaznice pretvara u fini sprej. Za vrijeme leta kroz komoru kapljice se skrućuju i padaju u prostor za skupljanje. Najsitnije čestice strujom plina prenose se u posebni spremnik.



Slika 4. Postupak plinske atomizacije [4].

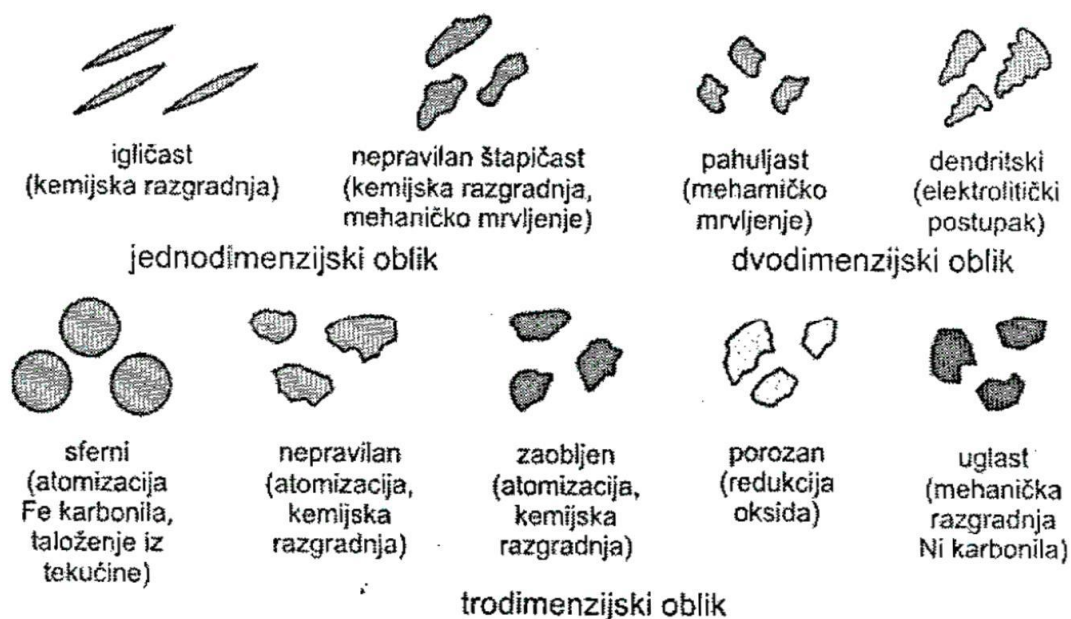
3.2. Svojstva praha

3.2.1. Kemijska svojstva praha

Kemijski sastav praha vrlo je bitan čimbenik koji utječe na svojstva gotovog proizvoda te na izbor tehnoloških parametara pojedinih faza PM procesa. Sastav praha među ostalim određuje temperaturu i vrijeme sinteriranja te vrstu plinske atmosfere kako tijekom sinteriranja ne bi došlo do neželjenih kemijskih reakcija između kompaktiranog komada i okoliša. Kemijski sastav praha podrazumijeva i sadržaj nečistoća (metalnih i nemetalnih) koje mogu biti prisutne u elementarnom stanju ili kao spojevi. Čistoća praha ovisi o postupku proizvodnje.

3.2.2. Fizikalna svojstva praha

Osnovna fizikalna svojstva praha jesu oblik i veličina čestica. Kao i kemijska svojstva i ona utječu na eksploatacijske karakteristike proizvoda i parametre tehnološkog procesa. Postoje razni oblici čestica ovisno o sirovini i načinu proizvodnje kao što prikazuje slika 5.



Slika 5. Oblici čestica praha i pripadajući proizvodni postupci [4].

Osim oblika čestica važna je i njihova veličina. Vrlo često se kod istog elementarnog praha, iz iste šarže, dobivenog istim postupkom, susreću čestice različitih dimenzija pa je važno odrediti i raspodjelu njihovih veličina.

3.2.3. Metalurška svojstva praha

Metalurška svojstva praha utječu na ponašanje praha i mješavine prahova prilikom mljevenja/miješanja, granuliranja i posebno kompaktiranja.

Najznačajnija metalurška svojstva praha jesu:

- nasipna gustoća
- stlačivost
- brzina tečenja[4]

3.3. Svojstva materijala dobivenih metalurgijom praha

Najčešći materijali inženjerskih prahova su prahovi metala i keramike. Svojstva prahova rezultat su postupka njihove proizvodnje, a predstavljaju vrlo bitan aspekt proizvodnje kompozita obzirom da o njima ovisi čitav niz svojstava konačnog kompozitnog materijala. Svojstva prahova o kojima u najvećoj mjeri ovise svojstva konsolidiranog materijala su:

- Oblik i građa čestica
- Specifična površina čestica
- Dimenzije čestica
- Kemijski sastav
- Tehnološka svojstva

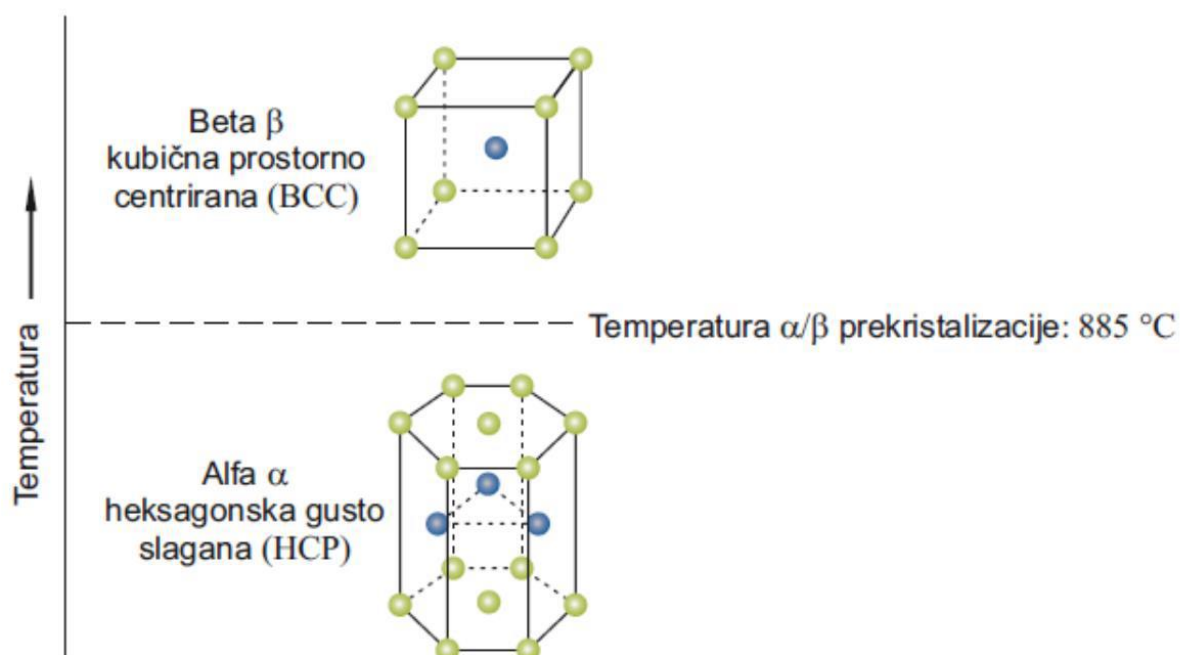
4. TITAN I NJEGOVE LEGURE

Titan (Ti) i njegove legure sve su zastupljeniji metalni materijali koji se primjenjuju zbog niza odličnih svojstava. Titan se kao i aluminij ubraja u vrlo raširene elemente. U zemljinoj kori ima ga oko 0,7% [1]. Ti se materijali prvenstveno rabe u primjenama gdje do izražaja dolaze njihove jedinstvene karakteristike, a to su prije svega visoko čvrste strukture i primjene koje zahtijevaju otpornost na koroziju.

4.1. Svojstva titana

Titan je polimorfan metal koji posjeduje alotropske modifikacije kristalne rešetke. Na sobnoj temperaturi ima heksagonsku gusto slaganu (HCP) rešetku, α -titan, koja na temperaturi 885 °C prelazi u kubičnu prostorno centriranu (BCC) rešetku, β -titan, koju zadržava do tališta.

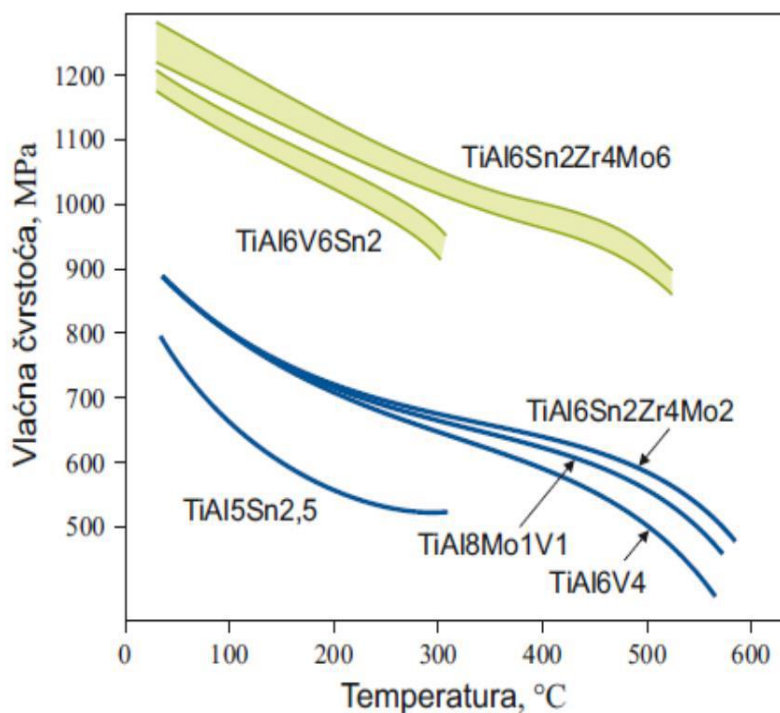
Kristalne strukture titana su prikazane na slici 6.



Slika 6. Kristalne strukture čistog titana [4].

Osnovni razlozi primjene titana jesu sljedeći:

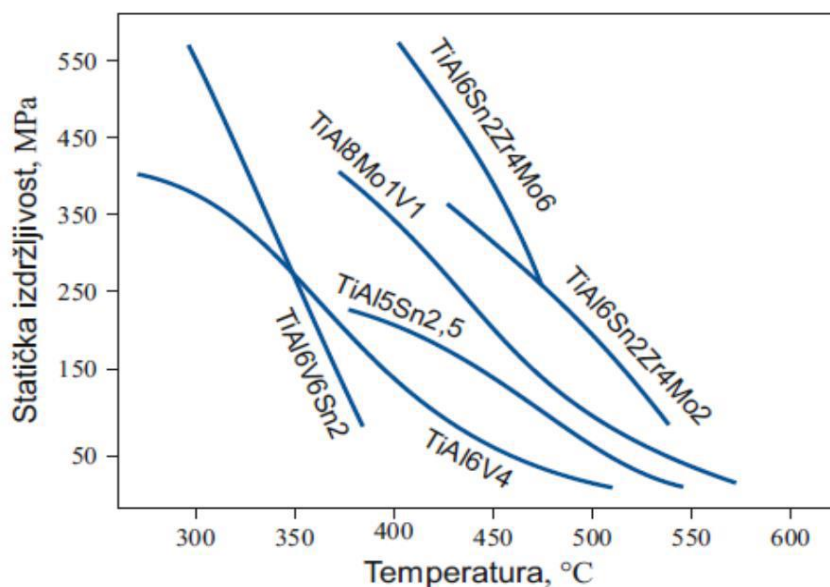
- **visoka čvrstoća;** Vrijednosti vlačne čvrstoće kao i granice razvlačenja su vrlo visoke osobito kod toplinski obradljivih precipitacijski očvrnutih legura
- **relativno niska gustoća;** S gustoćom od oko 4500 kg/m^3 titanove legure dvostruko su lakše od čelika i niklovih superlegura što im daje odličan omjer čvrstoće i gustoće.
- **visoka specifična čvrstoća;** Visoka čvrstoća u odnosu na masu omogućuje titanovim legurama da supstituiraju čelik u mnogim primjenama gdje je odlučujuća čvrstoća i dobra lomna žilavost. Visoku specifičnu čvrstoću zadržavaju u širokom području temperatura od -200 do 550°C .
- **visoka dinamička izdržljivost;** Ti-legure imaju mnogo bolju dinamičku izdržljivost od Al-legura.
- **toplinska stabilnost;** Legure titana postoje su do temperatura 315°C odnosno 600°C , ovisno o tipu legure (slika 7. i slika 8.)



Slika 7. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure[4]

Iz dijagrama na slici 7. vidljivo je da se vlačna čvrstoća smanjuje s porastom temperature za sve vrste legura

- **korozijska postojanost;** Korozijska otpornost titanovih materijala znatno je bolja od aluminijevih i čeličnih legura. Titanove legure visoko su postojane u različitim agresivnim medijima kao što su kloridne otopine, morska voda i kiseline. To zahvaljuju vrlo stabilnoj i postojanoj, čvrsto prionjenoj oksidnoj prevlaci koja nastaje na površini metala u oksidirajućoj okolini.
- **odlična biokompatibilnost;** Ti i njegove legure otporne su na djelovanje tjelesnih tekućina što im daje značajnu prednost u medicini.
- **dobra otpornost na puzanje;** Određene legure titana (α legure) posjeduju znatnu otpornost na puzanje.



Slika 8. Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure [4].

Titan je nemagnetičan i vrlo dobro provodi toplinu. Njegov koeficijent toplinske rastezljivosti niži je od onog za čelik i duplo manji od aluminijevog što jamči visoku dimenzijsku stabilnost dijelova od titana.

Neke legure titana s heksagonskom kristalnom strukturom zadržavaju dobru žilavost i pri niskim temperaturama. Nema prijelazne temperature žilavosti (α -legure).

Modul elastičnosti titanovih materijala kreće se u rasponu od 100 GPa do 120 GPa ovisno o sastavu i procesu preradbe i u većini konstrukcijskih primjena krutost je zadovoljavajuća. Dijelovi od titana pokazuju veću krutost od aluminijevih, ali su u usporedbi s čelikom elastičniji.

Sposobnost hladnog oblikovanja je ograničena i ako se zahtijevaju veći stupnjevi deformacije potrebna su česta međuzarenja. Pri višim temperaturama oblikovljivost je bolja, ali se pri tom ne smije prijeći 950 °C zbog velikog afiniteta titana prema kisiku, vodik, dušiku i ugljiku. Pri toplinskoj obradi ili tijekom deformiranja na zraku površina se prekriva oksidnom prevlakom koju je potrebno naknadno mehanički ukloniti. Zato se sitni dijelovi toplinski obrađuju u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina.

Titan je teško obradljiv odvajanjem čestica jer je vrlo žilav pa se lijepi, a postoji opasnost i od zapaljenja strugotine.

Sve vrste titanovih legura dobro su zavarljive u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu.

Naposljetku, iako je titan četvrti najzastupljeniji element u zemljinoj kori, njegova cijena je visoka uslijed izrazite reaktivnosti i visoke temperature tališta (1670 °C). Proizvodni troškovi i naročito troškovi prerade ovih legura danas su još uvijek vrlo visoki, što djelomično ograničava primjenu [4].

4.2. Titanove legure

Legirni elementi imaju važnu ulogu u mikrostrukтури i svojstvima Ti-legura. Legiranjem se tvore intersticijski i supstitucijski kristali mješanci, a deformirana kristalna rešetka rezultira povećanom čvrstoćom. Titanove legure općenito se klasificiraju prema sadržaju α i β faze u njihovoj mikrostrukтури na sobnoj temperaturi.

Razlikuju se **α , približno α , $\alpha+\beta$ i β legure.**

Kako samo ime ukazuje α legure ne sadrže β fazu, dok približno α legure sadrže najvećim dijelom α fazu uz tek neznatnu količinu β . Dvofazne $\alpha+\beta$ legure predstavljaju kompromis između monofaznih α i β legura. One su toplinski očvrstljive i oblikovljive deformiranjem, a mogu se i zavarivati iako se pri zavarivanju mogu javiti određene poteškoće. β legure većinom sadrže β fazu uz tek mali udio α faze [1].

4.3. Primjena titana i njegovih legura

Titan i njegove legure dokazano su tehnički superiorni konstrukcijski materijali. Glavna je prednost titana i njegovih legura što su vrlo čvrste, imaju malu gustoću, otporne su na koroziju i kompatibilne s novim kompozitnim materijalima. Nedostatak je njihova visoka cijena (10 do 20 puta viša u odnosu na aluminij). Zbog svega navedenog najviše se koriste u zrakoplovnoj industriji (99 %) i proizvodnji različitih projektila.

5. MAGNEZIJ I NJEGOVE LEGURE

Magnezija u zemljinoj kori ima oko 1,95 % te se dobiva iz karnalita, magnezij-kalij klorida, a dijelom i iz mora koje ga sadrži od 0,15%. Tri četvrtine svjetske proizvodnje magnezija dobiva se elektrolizom, a ostatak toplinskom redukcijom i destilacijom [1].

Magnezij ima HCP rešetku što mu omogućava dobru oblikovljivost pri višim temperaturama uslijed oslobađanja dodatnih kliznih ravnina.

Magnezij i njegove legure imaju najmanju gustoću među svim tehnički zanimljivim legurama s istovremeno osrednjom vlačnom čvrstoćom.

Čisti magnezij ima nisku čvrstoću te se zbog toga kao konstrukcijski materijali primjenjuju samo njegove legure čija je čvrstoća znatno veća.

5.1. Svojstva magnezija i njegovih legura:

- mala masa; konkurentne aluminijevim legurama u pogledu omjera čvrstoća/gustoća
- velika sposobnost prigušenja vibracija
- izvanredna rezljivost s obzirom na količinu obrađenog metala i trošenje alata
- neke legure imaju dobru livljivost i namijenjene su za tlačni lijev uz visoku proizvodnost
- inertnost prema čeličnim kalupima zbog čega je manje trošenje kalupa i smanjeno naljepljivanje
- primjena u lijevanom, kovanom, ekstrudiranom i valjanom stanju
- slaba otpornost na koroziju
- HCP rešetka ograničava mogućnost hladnog deformiranja
- nizak modul elastičnosti
- gornja temperatura granice uporabe je 300...350°C[1]

Mehanička svojstva magnezijevih legura ovise o sastavu, postupku dobivanja i toplinskoj obradi i prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti nekih fizikalnih i mehaničkih svojstava magnezija
(* ovisno o obradi). [1]

Gustoća	kg/m ³	1740
Talište	°C	649
Modul elastičnosti	N/mm ²	45100
Toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	25
Vlačna čvrstoća*	N/mm ²	80...180
Istezljivost*	%	1...12

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela je utvrditi ponašanje TiMg kompozita u uvjetima elektrokemijske korozije te odrediti utjecaj udjela magnezija na svojstva samog kompozita.

Osnovni zahtjev na kompozit je smanjenje krutosti titana obzirom da je namijenjen za implantate u ljudskom organizmu.

Također, svrha je dodatkom magnezija poboljšati korozijsku postojanost kompozita.

6.1. Opis eksperimenta

Ovaj eksperiment se sastoji od pripreme te elektrokemijskog ispitivanja uzoraka prethodno dobivenih miješanjem titanovog i magnezijevog praha.

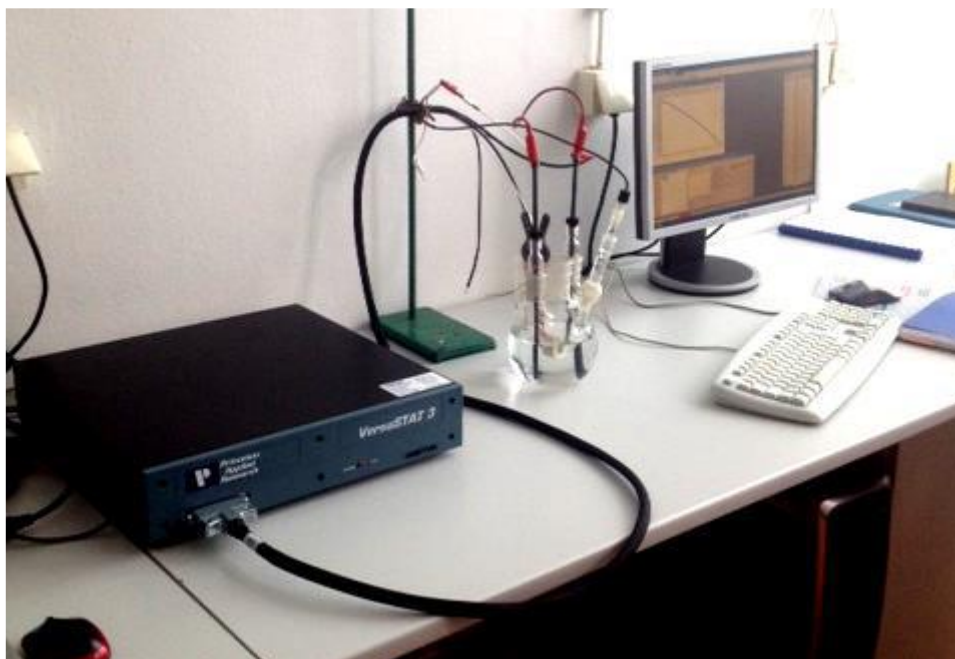
Korišteno je četiri uzoraka od kojih su dva s 5 (wt) % magnezija, a dva s 10 (wt) % magnezija.

Prije elektrokemijskog ispitivanja, uzorci su bili metalografski pripremljeni što će biti opisano u daljnjem izlaganju.

6.2. Elektrokemijsko ispitivanje

Elektrokemijsko ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Pritom se koristio uređaj Potentiostat/Galvanostat Model 273 EG&E uz primjenu SoftCorr III programskog paketa.

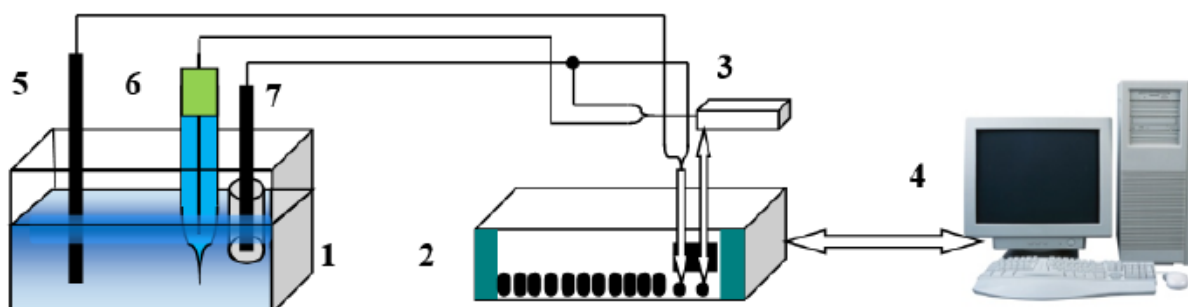
Slika uređaja s pripadajućom opremom je na slici 9.



Slika 9. Uređaj za elektrokemijsko ispitivanje Potentiostat/Galvanostat, Model 273 EG&E.

Potentiostat je uređaj koji ima dvije glavne funkcije pri elektrokemijskom ispitivanju:

- 1) Manipulira razlikom potencijala između radne i referentne elektrode odn. nameće primijenjeni električni potencijal
- 2) Mjeri tok električne struje između radne elektrode i protuelektrode. Taj parametar zovemo *ukupnom strujom* [5]



Slika 10. Shema osnovnog elektrokemijskog ispitivanja na Potentiostatu/Galvanostatu.

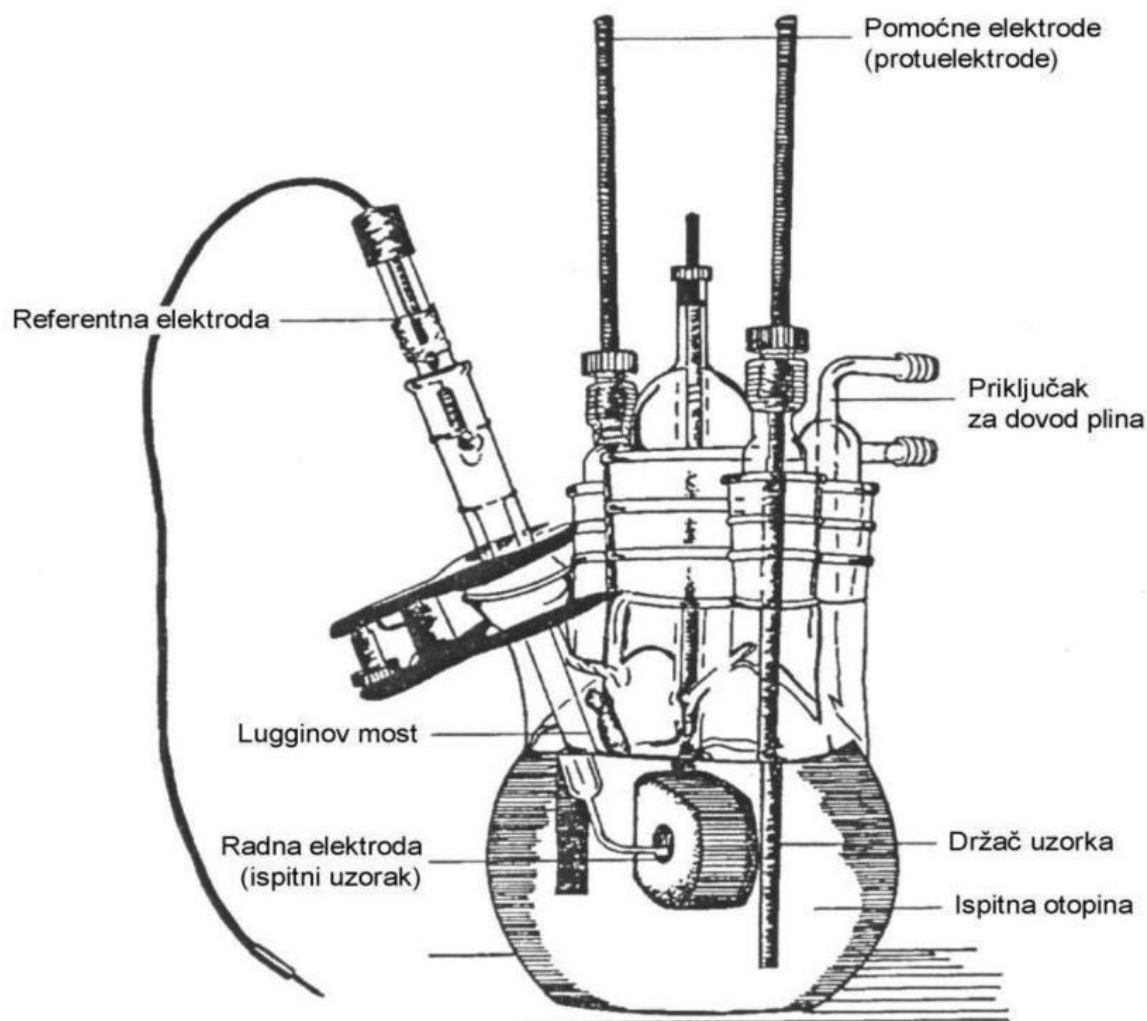
Dijelovi ispitivačkog sustava na slici 10 su :

1. Ispitivačka ćelija
2. Potenciostat/galvanostat
3. Elektrometar
4. Programski softver
5. Pomoćna elektroda (protuelektroda)
6. Uzorak (radna elektroda)
7. Referentna elektroda

Samo ispitivanje se provodi u elektrokemijskoj ćeliji koja sadrži posudu s otopinom, metalni uzorak (često zvan i radna elektroda) koji je uronjen u otopinu, referentnu elektrodu te protuelektrodu (mogu biti i dvije). Ćelija sa svim komponentama prikazana je na slici 11. Referentna elektroda je u kontaktu s otopinom preko cijevi te osigurava optimalno pozicioniranje elektrode. Cijev je spojena sa strojem preko kabla sa pecaljkom za prihvaćanje elektrode.

Protuelektroda koja se koristila u ovom ispitivanju bila je grafitna. Ona služi za održavanje korozijske struje radnoj elektrodi tijekom ispitivanja [5].

Kao otopina za ispitivanje korištena je Ringerova otopina jer je ona najbližnja tjelesnoj tekućini ljudskog organizma koja je potencijalno medij za koroziju implantata. Ona je po sastavu uravnotežena izotonična otopina mineralnih soli (natrijeva, kalijeva i kalcijeva klorida) u koncentracijama koje odgovaraju sastavu krvne plazme.



Silka 11. Tipična elektrokemijska ćelija sa osnovnim dijelovima[6].

Uzorci ispitivanja TiMg10 i TiMg5 su bili različitih dimenzija pa to trebalo uzeti u obzir prilikom postavljanja pokusa i izračuna. Također, uspoređivat će se samo jedan uzorak s 10%Mg i jedan s 5%Mg.

Prije uranjanja u otopinu i pokretanja stroja, uzorci su prekriveni polimernom masom radi osiguravanja kontakta s elektrodom i izoliranja preostale površine uzoraka kako bi samo površina namijenjena ispitivanju bila izložena koroziji.

Fizikalna i kemijska svojstva su prikazana u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva materijala na kojima su provedena elektrokemijska ispitivanja.

Uzorak	$w_{Mg} [\%]$	$w_{Ti} [\%]$	$E_w [g]$	$\rho [g/cm^3]$	$A [mm^2]$
TiMg5	5	95	23,35	1,32	71,5
TiMg10	10	90	22,76	4,15	44

gdje su: w - masneni udio

E_w - ekvivalentna masa

ρ - gustoća

A - površina izlaganja otapanju (koroziji)

6.3. Metalografska analiza materijala

Kako bi se uočile moguće promjene strukture uzoraka prilikom provđenja ispitivanja bilo je potrebno provesti analizu mikrostrukture uzoraka. Iz tog razloga uzorci su prethodno metalografski bili pripremljeni prema uputama za pripremu titanovih legura. Priprema je provedena u nekoliko postupaka te će biti opisana u idućem poglavlju.












6.3.1. Metalografska priprema uzoraka

Da bi se ispitalo korozijsko ponašanje materijala različitih sastava, potrebno je izvršiti pripremu uzoraka za ispitivanje. Priprema je sadržavala:

1. Izrezivanje uzoraka iz konsolidiranog materijala
2. Odrstanjivanje kapsule strojnom obradom
3. Brušenje i poliranje uzoraka
4. Čišćenje površine uzoraka

Uzorci su izrezani na mikro-rezalici Accuta 2 uz vodeno hlađenje kako bi se spriječile strukturne promjene uslijed zagrijavanja. Nakon izrezivanja brušeni su brusnim papirima na Buehler uređaju i to oznake 500,1000 te 2000. Nakon brušenja uzorci su podvrgnuti poliranju dijamantnim pastama od 9 μm i 3 μm .

Parametre pojedine faze pripreme uzoraka prikazuje slika 12.

BRUŠENJE				POLIRANJE		
Korak		PG	FG 1	Korak		PG
	Površina	SiC papir, #320	MD - Largo		Površina	MD - Chem
	Suspenzija		DiaPro Allegro / Largo		Suspenzija	OP - S
	Lubrikant	Voda			okretaji u minuti	150
	Okretaji u minuti	300	150		Sila [N]	35 po uzorku
	Sila [N]	25 po uzorku	30 po uzorku		Vrijeme	5 - 10 min
	Vrijeme	Po potrebi	5 min			

Slika 12. Parametri metalografske pripreme uzoraka [2].

6.3.2. Analiza mikrostrukture uzoraka

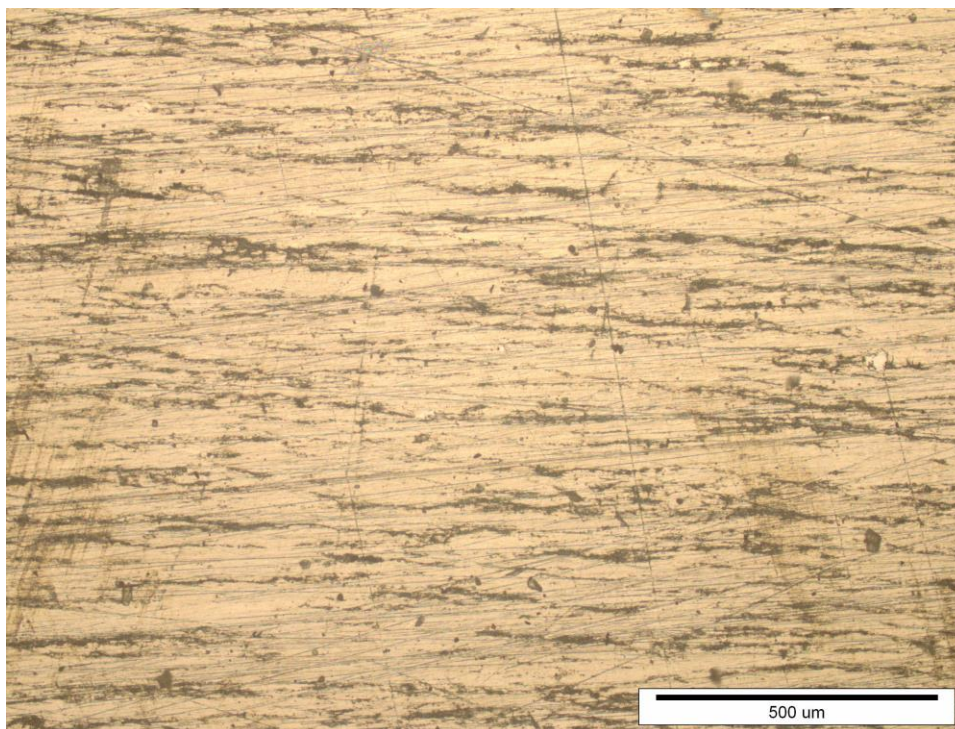
Provedena je analiza mikrostrukture na pripremljenim uzorcima u svrhu promatranja raspodjele i veličine čestica magnezija u kompozitu. Da bi se opisao utjecaj korozije na materijal, analiza mikrostrukture je provedena prije i poslije elektrokemijskog ispitivanja.

Mikrostrukturna analiza provedena je u laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na svjetlosnom mikroskopu modela OLYMPUS GX-51.

Na slikama 13. i 14. prikazana je mikrostruktura uzoraka prije korozijskog ispitivanja na svjetlosnom mikroskopu.

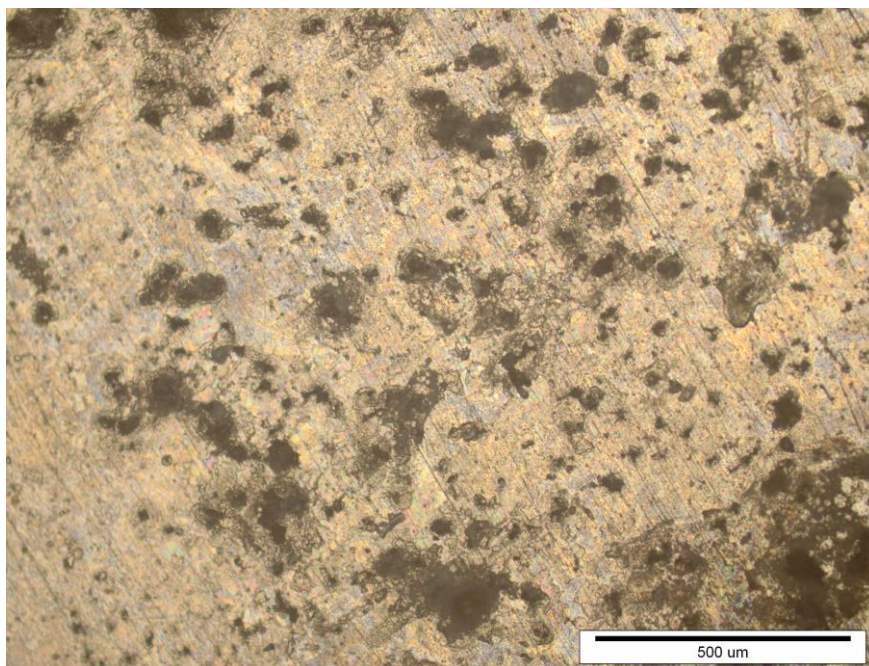


Slika 13. Mikrostruktura TiMg5II u početnom stanju uz povećanje 200x

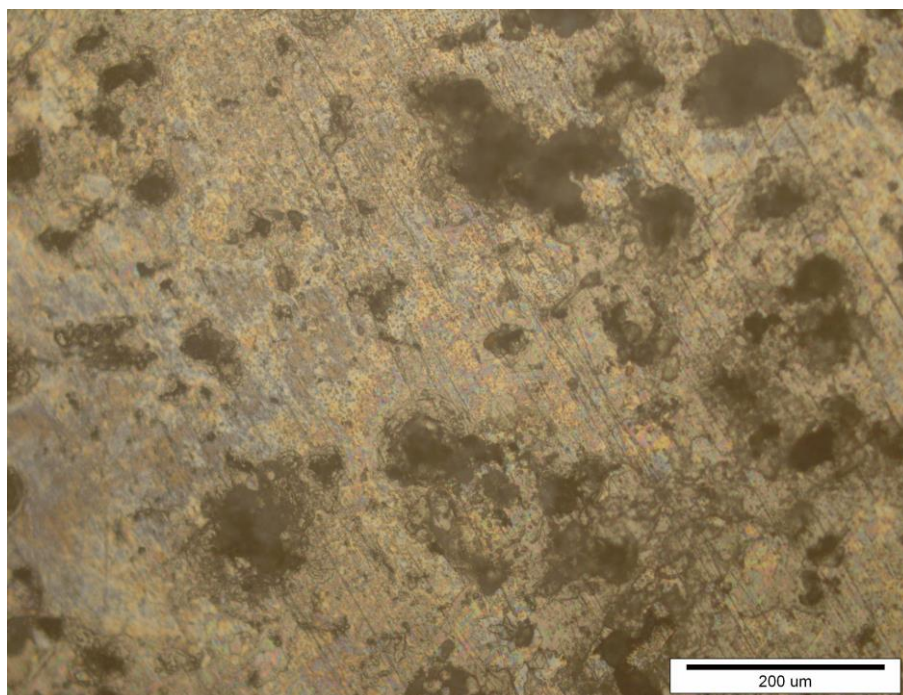


Slika 14. Mikrostruktura uzorka TiMg10I u početnom stanju uz povećanje 100x

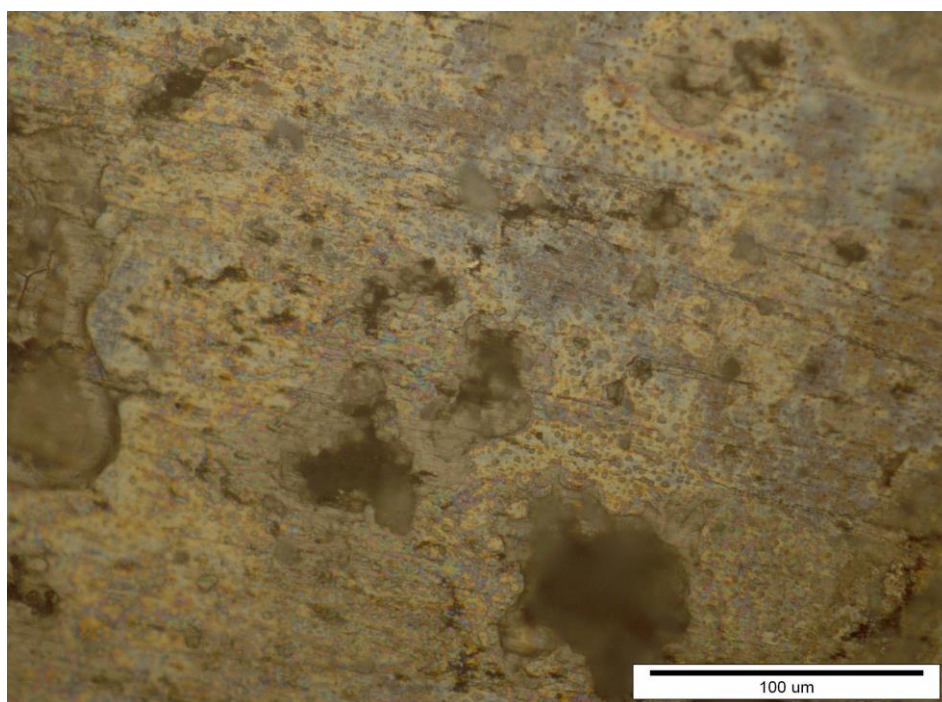
Na slikama 15.-24. nalazi se mikrostruktura uzoraka nakon korozijskog ispitivanja.



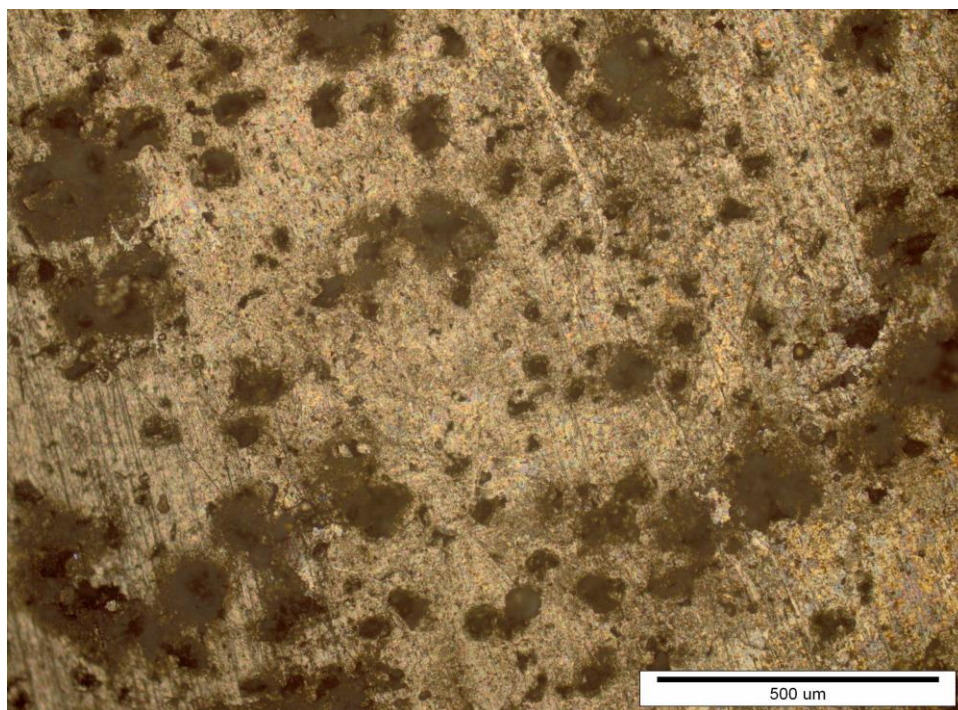
Slika 15. Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 100x.



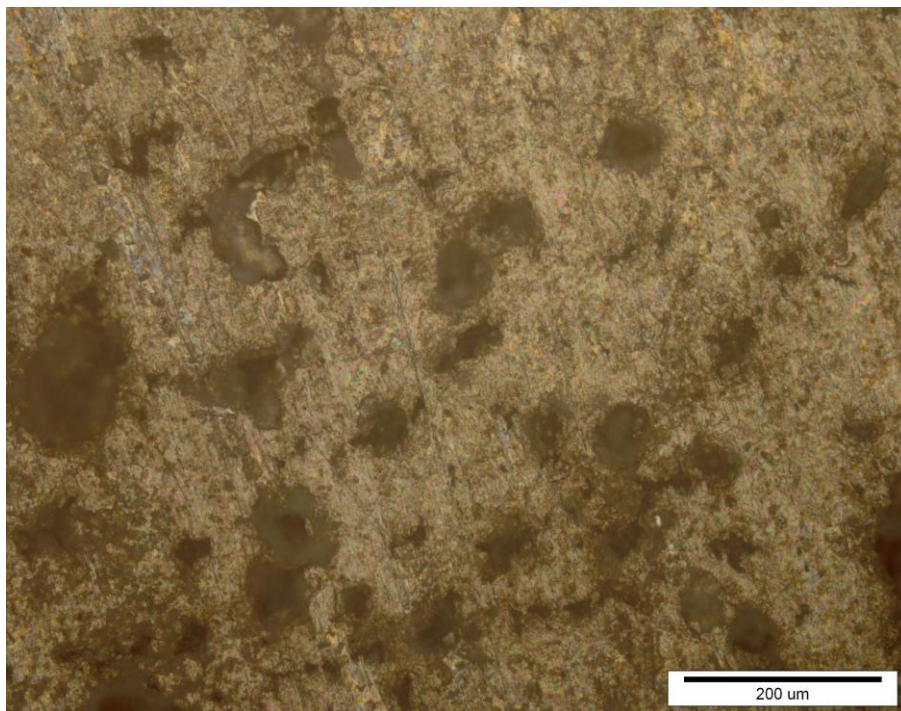
Slika 16. Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 200x.



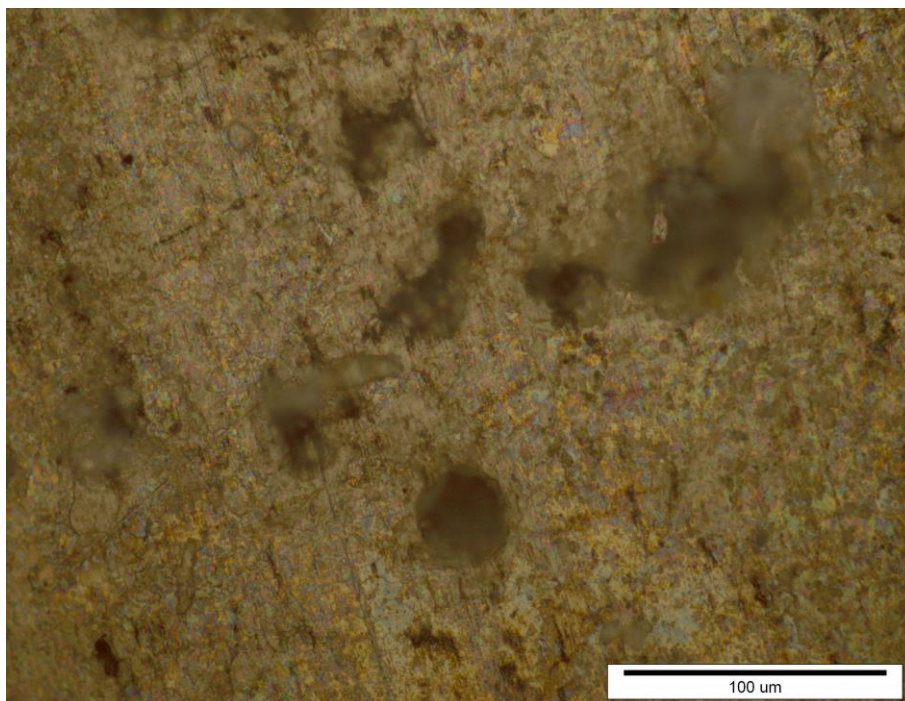
Slika 17. Mikrostruktura uzorka TiMg5I nakon korozije uz povećanje 500x.



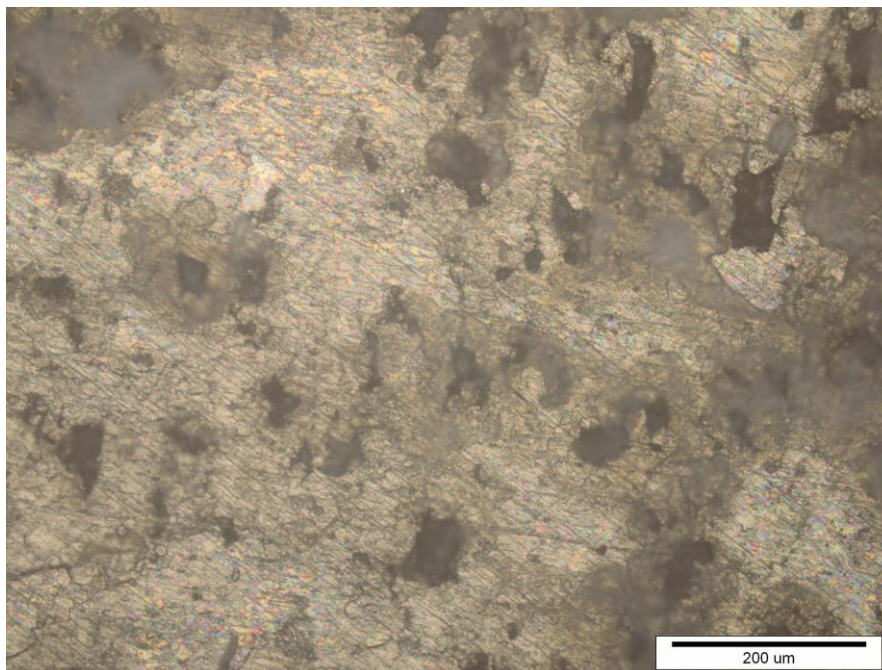
Slika 18. Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 100x.



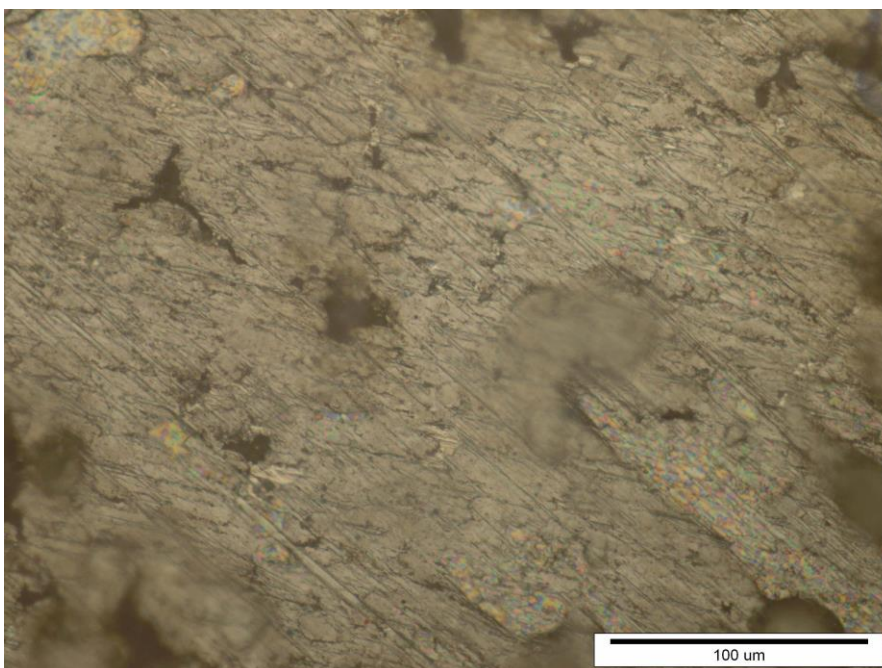
Slika 19. Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 200x.



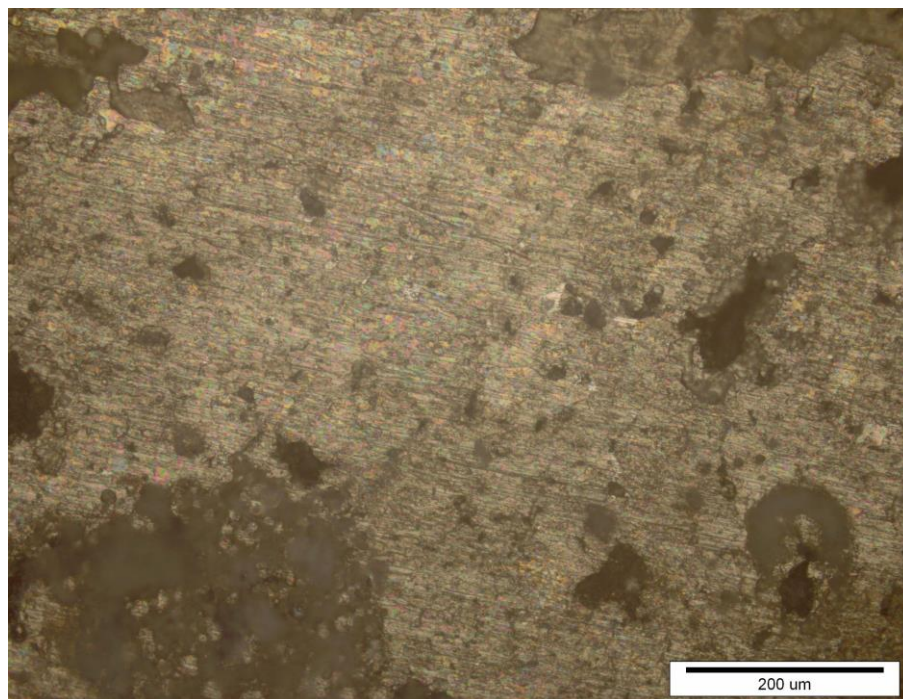
Slika 20. Mikrostruktura uzorka TiMg5II nakon korozije uz povećanje 500



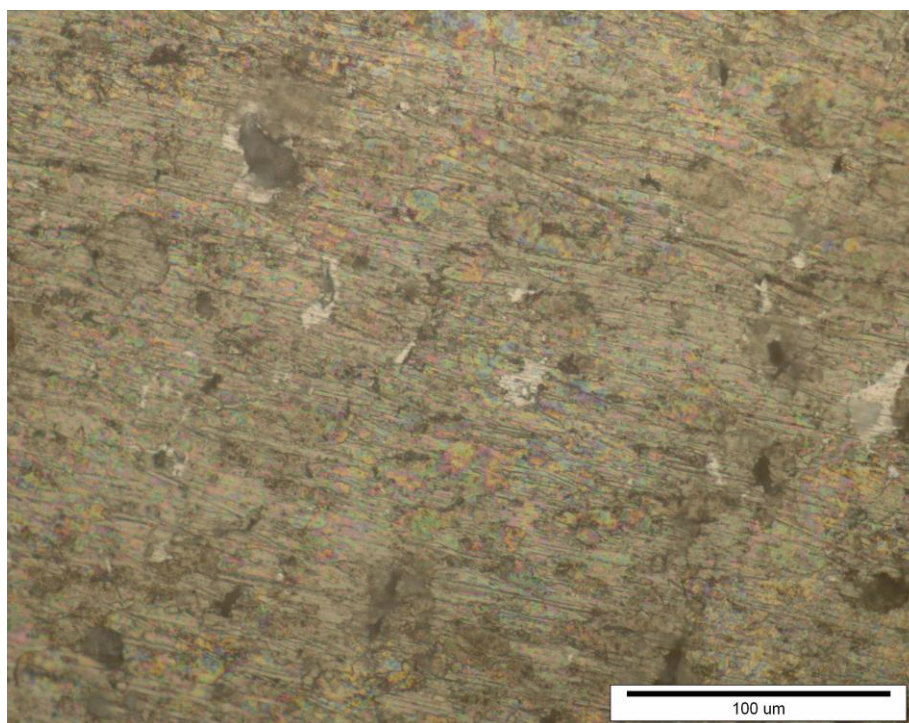
Slika 21. Mikrostruktura uzorka TiMg10I nakon korozije uz povećanje 200x.



Slika 22. Mikrostruktura uzorka TiMg10I nakon korozije uz povećanje 500x.

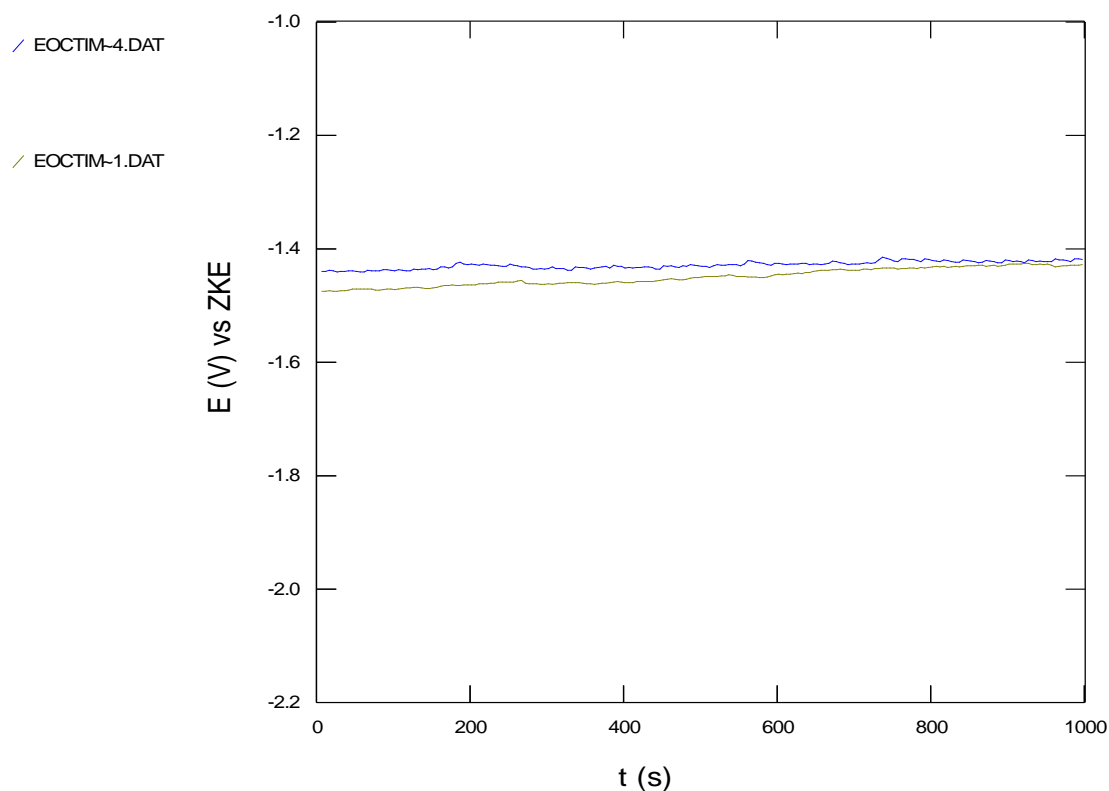


Slika 23. Mikrostruktura uzorka TiMg10II nakon korozije uz povećanje 200x.



Slika 24. Mikrostruktura uzorka TiMg10II nakon korozije uz povećanje 500x.

6.4. Analiza ispitivanja i rezultati



Prilikom ispitivanja svakog uzorka, pomoću programskog softvera SoftCorr III su korištene tri metode:

- Ekor
- Linearna polarizacija
- Tafel meroda

Ekor metoda se služi računanjem elektrokemijskog potencijala kojeg zovemo **potencijal otvorenog strujnog kruga** koji nastaje kao posljedica reakcije između metala i elektrolita. Iznos tog potencijala se ne može direktno mjeriti jer svi uređaji mjere razliku potencijala. Stoga, korozijski potencijal se može jedino uporediti s potencijalom neke reference, a tome služi referentna elektroda čiji je potencijal poznat [5].

Potencijal otvorenog strujnog kruga je parametar koji opisuje potencijal radne elektrode (metala) u odnosu na referentnu kada među njima ne teče električna struja.

Mjerimo ga uređajem koji se zove **elektrometar** [7].

Ispitivanjem električnog potencijala TiMg5 i TiMg10 uzoraka dobiven je graf na Slici 25.

Slika 25. Ovisnost potencijala o vremenu TiMg5 (krivulja 1) i TiMg10 (krivulja 4) uzoraka

Metoda linearne polarizacije se koristi za računanje **otpora polarizacije R_p** .

Njega definiramo kao otpor uzorka oksidaciji pod utjecajem vanjskog potencijala. Pomoću vrijednosti tog otpora možemo izračunati brzinu korozije.

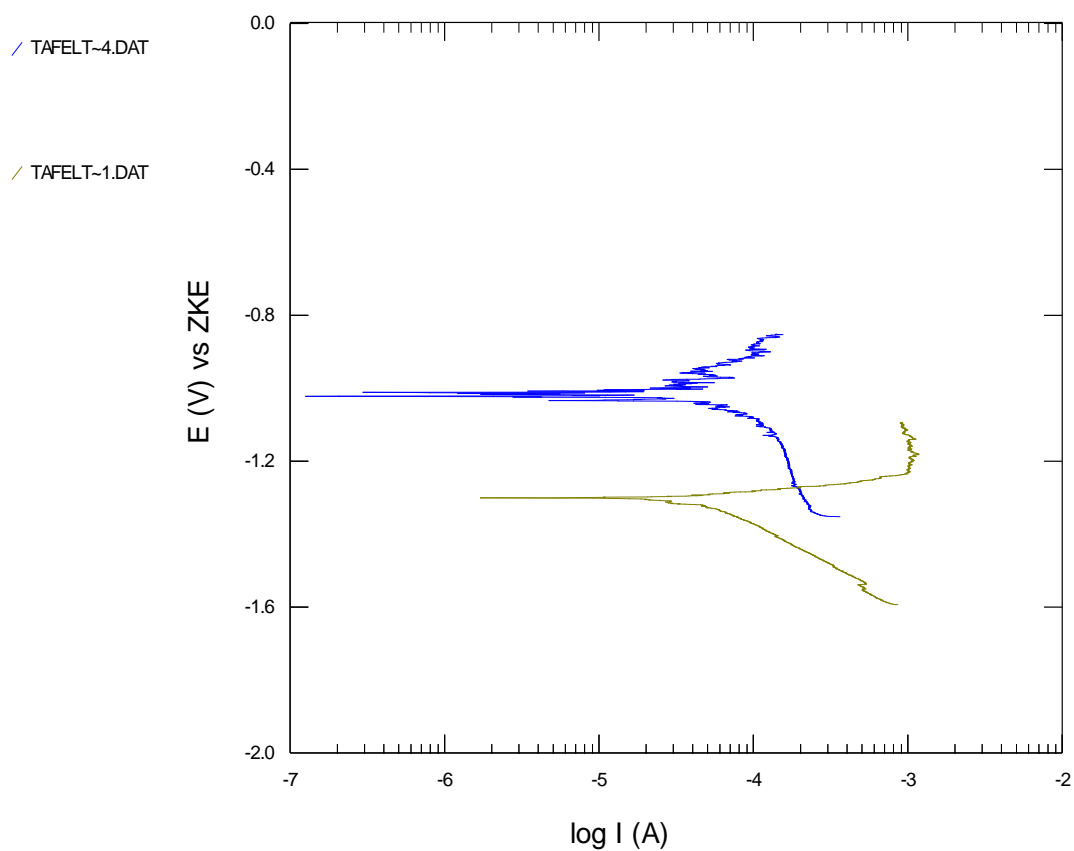
U ovom procesu podatke dobivamo skeniranjem raspona $\pm 20\text{mV}$ od E_{kor} potencijala. Skeniranje obično počinje od -20mV vs. E_{kor} i završava na $+20\text{mV}$ vs. E_{kor} . Brzina skeniranja je najčešće $0,1\text{ mV/s}$ [5].

Tafel metoda se služi mjerenjem **korozijske struje I_{kor}** kako bi se pomoću nje dobila brzina korozije v_{kor} . Tafel dijagram može dobiti tu struju direktno ili može izračunati Tafel konstante koje predstavljaju nagibe anodnog i katodnog dijela krivulje β_A i β_K . Njih možemo koristiti za računanje I_{kor} .

Tafel graf je moguće dobiti skeniranjem od -250 mV u odnosu na E_{kor} (za katodnu krivulju) ili od $+250\text{ mV}$ u odnosu na E_{kor} (za anodnu krivulju). Brzina skeniranja je najčešće $0,1\text{ mV/s}$.

Dobivena krivulja je odnosa narinutog potencijala i logaritma izmjerene struje.[5]

Ispitivanjem uzoraka Tafel metodom dobiven je dijagram na Slici 26.



Slika 26. Tafel krivulja za TiMg5 i TiMg10 u ovisnosti potencijala i logaritma korozijske struje.

Na temelju vrijednosti E_{kor} potencijala na kraju i ispitivanja i ekstrapoliranih Tafelovih krivulja određeni su različiti korozijski parametri prikazani u Tablici 4.

Tablica 4. Elektrokemijski parametri dobiveni ekstrapolacijom Tafelovih krivulja i krajnjih vrijednosti Ekor potencijala.

Uzorak	E_{kor} vs. ZKE, V	I_{kor} , μA	β_A	β_k	v_{kor} , mm/god
TiMg5	-1,43	45,84	$29,91 \cdot 10^{-3}$	$214,7 \cdot 10^{-3}$	$19,86 \cdot 10^{-3}$
TiMg10	-1,42	85,85	$209,8 \cdot 10^{-3}$	$578,4 \cdot 10^{-3}$	$37,25 \cdot 10^{-3}$

Ovi rezultati nam ukazuju da promjena potencijala ide u smjeru pasivacije površine budući da su kod oba uzorka negativna. Također među njima gotovo da i nema razlike, tako da nam ovi rezultati ne ukazuju na znatne razlike pri pasivaciji ispitivanih uzorka. Usporedbom Tafelovih krivulja, zaključujemo da uzorak s 10 % Mg korodira brže, i to skoro za 50 %. Većem otapanju svjedoči i iznos toka korozijske struje koji je znatno veći kod TiMg10 uzorka. Mikrostruktura također pokazuje bržu koroziju TiMg10 uzorka te veću količinu izlučenog magnezija.

7. ZAKLJUČAK

S ciljem istraživanja ponašanja novog titan-magnezij kompozita u primjeni kod biomedicinskih implantata provedena je teoretska analiza u vidu dobivanja tog materijala te su ispitivana njegovo ponašanje u uvjetima elektrokemijske korozije. Iz tih podataka može se zaključiti da se taj materijal definitivno može dobiti postupkom metalurgije praha s obzirom na zahtjeve i primjenu. Nadalje, svojstva TiMg kompozita ovise o mnogo faktora kao što su agresivnost i svojstva medija u kojem se nalazi, temperatura, njegov sastav, način dobivanja i sl.

U eksperimentalnom dijelu smo vidjeli da kompozit s više magnezija brže korodira, ali taj rezultat varira s obzirom na uvjete i parametre korištene u ispitivanju. Stoga, različitim ispitivanjima dobit ćemo različite rezultate i jako je teško u potpunosti definirati ponašanje nekog materijala u njegovoj primjeni. Isto tako bilo bi nužno utvrditi da li je brže otapanje povoljnije za primjenu u vidu implantata odn. da li bi intenzivnije otapanje uzrokovalo umrežavanje Mg faze i na taj način izazvalo nekontroliranu koroziju u dublje slojeve materijala, što bi svakako bilo nepoželjno.

Dakle, kako bi u potpunosti bili upoznati sa svojstvima nekog materijala, potrebno je testirati ga i u praksi jer jer svako ispitivanje može dati drugačije rezultate i nijedno od njih ne može potpuno opisati materijal. Da bi znali mogućnosti primjene titan-magnezij kompozita, treba vidjeti kako se on ponaša kao implantat kod većeg broja ljudi i detektirati njegove prednosti i mane kako bi ga konstantno mogli unaprijediti.

Stoga, moje rješenje predlaže nastavak teorijskih analiza uz ozbiljniji praktični razvoj.

LITERATURA

- [1] T.Filetin, F.Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2011.
- [2] Šnajder Musa, M.: *Razvoj titan-magnezij kompozita za biomedicinsku primjenu*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] TechTrends, International reports on advanced technologies: *Metal matrix composites: technology and industrial application*, Innovation 128, Paris, 1990.
- [4] Čorić, D.: *Posebni metalni materijali- Predavanja (III dio)*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [5] Rothstein, M.L.: *Electrochemical corrosion measurements for the metal finishing industr*, Princeton applied research, 2009.
- [6] Majdak, I.: *Korozijska postojanost nanostrukturiranih tvrdih metala*, Diplomski rad, Zagreb, 2016.
- [7] *Open circuit potential*, <https://www.corrosionpedia.com/definition/834/open-circuit-potential-ocp>, 05.09.2017.